

KINEMATIC STUDY OF AN AGRICULTURAL ROBOTIC PLATFORM**ESTUDIO CINEMÁTICO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA
AGRICULTURA**

MSc. Clayton José Torres*, MSc. John Faber Archila*, DSc. Mário Luiz Tronco*
DSc. Marcelo Becker*, DSc. Arthur José Viera Porto*, DSc. Alexander José Tiberti***

*** Universidade de São Paulo USP - EESC NEPAS LabRoM.**

Av Trabalhador Saocarlense 400, Sao carlos SP, Brasil.

E-mail: {claytonjt, john.faber, mltronco, Becker, ajvporto, atibreti}@sc.usp.br.

Tel.: +(55) 16 33738646 CEP 13566-590.

**** Universidad Industrial de Santander UIS, GIROD.**

Cr 27 Cll 9, Bucaramanga, Santander, Colombia.

Tel.: +(57) 7 6344000 Ext 2887 CP 680002.

E-mail: jfarchid@uis.edu.co.

Abstract: This research work presents the direct kinematic model of Agricultural Robot Mobile RAM, which is compared to others Ackerman models types presented in the literature, the work was simulated in Matlab and three models were compared. The RAM robot is a mobile robotic platform developed to act in precision agriculture, has independent steering at front wheels drive four-wheel independent. it used DC electric motors and encoders for positioning and control. The results of this study will be implemented on a new control system for improve the performance in smaller radius curves, facilitating field maneuvers.

Keywords: Robotic, mobile robotics, inverse kinematics.

Resumen: El presente trabajo de investigación, presenta el modelo cinemático directo do Robot Agrícola Móvil RAM, donde es comparando con otros modelos como Ackerman y modelos presentados en la literatura técnica, el trabajo simula en Matlab tres modelos y compara los resultados encontrados en cada modelo. El robot RAM es una plataforma robótica móvil desarrollada para actuar en la agricultura de precisión, consta de dirección independiente en las ruedas delanteras y tracción independiente en las cuatro ruedas. Siendo utilizados motores eléctricos DC y enconders para posicionamiento e control. Los resultados del presente trabajo serán implementados en un nuevo sistema de control, para obtener un mejor desempeño en curvas de radio menor, facilitando así las maniobras en campo.

Palabras clave: Robótica, robótica móvil, cinemática inversa.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica Agrícola es un área actualmente muy importante, debido al actual concepto de Agricultura de precisión, la cual busca atender las necesidades de los cultivos de manera

personalizada tal como se realizaba antiguamente. Para conseguir dicha atención “personalizada” a las necesidades del cultivo se necesitan herramientas de automatización y robótica adecuadas o a la medida de las necesidades de cada cultivo región clima cultura, etc.

La robotización agrícola comenzó con implementación de equipos automáticos en tractores (Bell *et al.*, 2010, Kise *et al.*, 2002; Rajamani, 2006; Savage, 2012), posteriormente se desarrollaron plataformas robóticas como el caso del robot deshierbador (Bakker *et al.*, 2010) y el Vehículo Autónomo de Apoyo para Agricultura (Reid *et al.*, 2000). Para lograr que dichos robots consigan realizar las tareas agrícolas es necesario contar con modelos matemáticos que permitan conocer y controlar los robots en cuestión.

En el actual trabajo se presentan tres modelos cinemáticos el modelo clásico de la bicicleta el tipo Ackerman y el último desarrollado por los autores el cual no simplifica la configuración del robot, comparando los resultados de los modelos que son aplicados al robot Agrícola RAM presentado en la figura 1. El cual se describe en detalle junto con su respectivo modelo CAD. Finalmente se muestran los resultados de las simulaciones en Matlab con las ventajas y desventajas de cada método



Fig. 1. Robot Agrícola Móvil, RAM Fuente NEPAS

2. ANTECEDENTES

La presente investigación tiene como base un modelo matemático el cual es referencia cuando se trata de cinemática vehicular. El modelo es conocido por su geometría y es denominado Ackerman el cual presenta un resultado adecuado para automóviles y camiones con dirección delantera, en robótica su uso es posible siempre y cuando la geometría corresponda y ofrece resultados satisfactorios considerando que la plataforma robótica trabaje con velocidades reducidas, lo que disminuye los efectos dinámicos, llegando al punto de desconsiderarlos en el control.

Para que haya un mejor entendimiento sobre las ecuaciones que fueron utilizadas en el trabajo, será utilizado inicialmente el modelo de la bicicleta como se describe en (Maxwell, 2012; Findlay *et al.*, 2012), el cual se puede observar en la figura 2, en el modelo de la bicicleta, las dos ruedas delanteras izquierda y derecha son representadas por una única rueda en el punto A. de la misma manera que las ruedas traseras son representadas por una rueda central, trasera en el punto B. Los ángulos de dirección para la rueda delantera y trasera son representados por δ_f y δ_r , respectivamente. El modelo es derivado asumiendo que ambas ruedas delanteras y traseras pueden tener alguna dislocación angular. Sin embargo la rueda delantera es la única encargada de la dirección, el ángulo de la dirección δ_r ,

Puede ser ajustado a cero. El centro de gravedad (C.G.) del vehículo está en el punto C y las distancias de los puntos A y B a partir del C.G. del vehículo son: $l(f)$ y $l(c)$, respectivamente y la distancia entre ejes del vehículo es $L = l_f + l_c$.

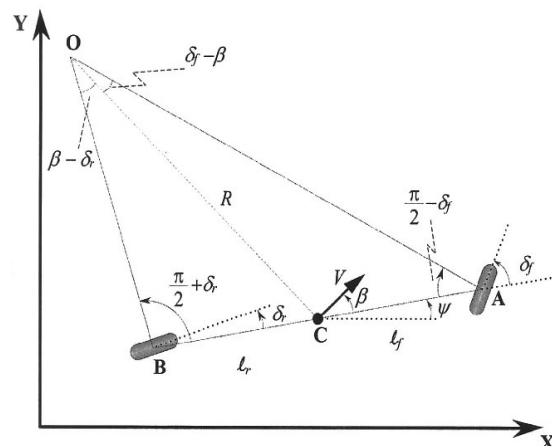


Fig. 2. Cinemática del movimiento lateral, modelo de la bicicleta. (Maxwell, 2012)

3. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en el trabajo está directamente relacionada a modelos cinemáticos descritos por Maxwell, donde se establece la necesidad de conocer la relación entre el ángulo de dirección del volante y el de la orientación de las ruedas. La correlación entre dichos ángulos es descrita por la geometría Ackerman, donde dado un ángulo de dirección en el volante es posible determinar el radio de curvatura instantáneo del vehículo (R) en bajas velocidades (Maxwell, 2012). La figura 3 presenta la geometría Ackerman.

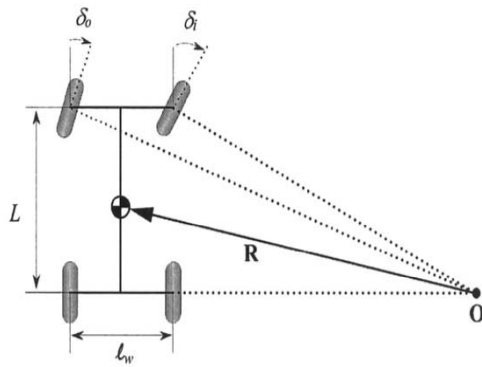


Fig. 3. Geometría Ackerman (Rajamani, 2006)

A partir de la geometría es posible generar los modelos matemáticos utilizados en la cinemática, uno de los modelos fue desarrollado por Rajamani, el cual será referencia en las simulaciones del presente trabajo. En resumen las ecuaciones desarrolladas por Rajamani se presentan en la figura 4.

SUMMARY OF KINEMATIC MODEL EQUATIONS		
Symbol	Nomenclature	Equation
X	Global X axis coordinate	$\dot{X} = V \cos(\psi + \beta)$
Y	Global Y axis coordinate	$\dot{Y} = V \sin(\psi + \beta)$
ψ	Yaw angle, orientation angle of vehicle with respect to global X axis	$\dot{\psi} = \frac{V \cos(\beta)}{\ell_f + \ell_r} (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r))$
β	Vehicle slip angle	$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\ell_f \tan \delta_r + \ell_r \tan \delta_f}{\ell_f + \ell_r} \right)$

Fig. 4. Resumen de las ecuaciones del modelo cinemático (Rajamani, 2000)

Con los modelos cinemáticos es posible desarrollar estrategias de control, establecer trayectorias, y determinar restricciones geométricas y mecánicas del vehículo. En el presente trabajo se toman dos diferentes modelos matemáticos existentes en la literatura, se desarrolla un modelo nuevo propuesto por los autores y se compara con los modelos de Ramajani y Tabile.

3. DESARROLLO

El desarrollo de las ecuaciones cinemáticas del presente trabajo utiliza datos obtenidos por medición directa sobre la plataforma RAM (Robot Agrícola Móvil), plataforma que tiene un modelo cinemático desarrollado, que también será utilizado como referencia comparativa en la simulación.

Para la implementación del modelo cinemático es necesario conocer las posiciones angulares de las ruedas al describir una curva, otros parámetros relevantes para el modelo tales como como referencias fija, inercial y móvil son presentadas en la figura 5.

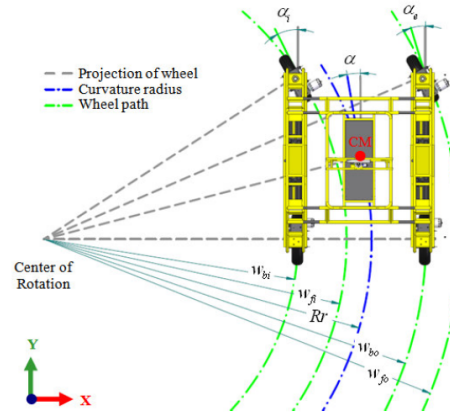


Fig. 5. Geometría Ackerman (Tabile, 2011)

Las ecuaciones presentadas en (1) y (2) son en función del ancho (c) y de la longitud (l) del vehículo. Teniendo limitado el ángulo máximo de la rueda interior (α_i) en 45° , así que el ángulo mínimo de dirección del vehículo se obtuvo como el radio mínimo de curvatura instantánea. Matemáticamente se aprecia en las ecuaciones 1 y 2 (Tabile, 2011).

$$\alpha_i = \arctan \left(c / \left\{ \frac{c}{\tan x} - 2 \right\} - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_o = \arctan \left(c / \left\{ \frac{c}{\tan x} + 2 \right\} + \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

3.1 Restricciones Mecánicas

Debido a las restricciones mecánicas la plataforma robótica RAM tiene limitado el movimiento de orientación angular de las ruedas a un ángulo máximo de 45° en ambos sentidos, imposibilitando así ejecutar maniobra donde el radio de curvatura fuese pequeño. De tal manera que se hace necesario obtener un modelo cinemático que considere las restricciones de la plataforma robótica.

3.2 Cinemática

El modelo de la geometría Ackerman de la figura 6 fue utilizado en el desarrollo de las ecuaciones cinemáticas para la plataforma RAM, en la figura se representa el radio de curvatura por (R), los ángulos de direccionamiento de las ruedas por (α_i y α_o), la longitud por ($L = d_b + d_a$), el ancho ($l_w = l_b + l_a$) y la velocidad de giro del robot (V_r).

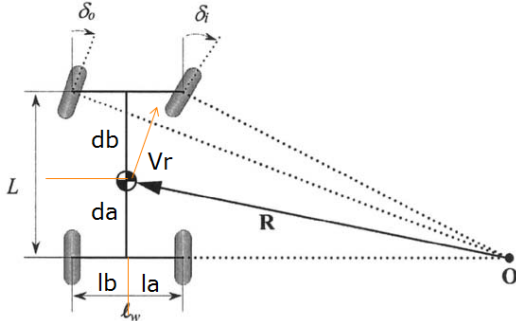


Fig. 6. Geometría Ackerman

El modelo cinemático considera los parámetros físicos del robot y sus dimensiones generales. Con esto se obtienen las ecuaciones 3 a la 12 para la cinemática inversa.

Ecuaciones de la cinemática inversa, asumiendo un R deseado.

$$(l_a + r_i)^2 = R^2 - d_a^2 \quad (3)$$

$$r_i = \sqrt{R^2 - d_a^2} - l_a \quad (4)$$

$$B = \frac{P}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{l_a + r_i}{d_a} \right) \quad (5)$$

$$B = \cot^{-1} \left(\frac{l_a + r_i}{d_a} \right) \quad (6)$$

$$B = \cos^{-1} \left(\frac{d_a}{R} \right) \quad (7)$$

$$r_o = r_i + l_a + l_b \quad (8)$$

$$r_{fi} = \sqrt{r_i^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (9)$$

$$r_{fo} = \sqrt{(r_i + l_a + l_b)^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (10)$$

$$d_{fi} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_i}{d_a + d_b} \right) \quad (11)$$

$$d_{fo} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_i + l_a + l_b}{d_a + d_b} \right) \quad (12)$$

Debido a la trayectoria ejercida por el vehículo durante la curva y el ángulo formado entre las ruedas y el centro de rotación, es necesaria la existencia de un diferencial de velocidad en cada una de las ruedas evitando el fenómeno conocido como *Wheel slip* (Buckholtz, 2002), el diferencial es determinado por las ecuaciones 23 a 26, donde las variables de las ruedas están dispuestas de la siguiente manera: (w_{fo}) delantera izquierda, (w_{fi}) delantera derecha, (w_o) trasera izquierda y (w_i) trasera derecha.

Ecuaciones de las velocidades angulares.

$$w_i = \frac{r_i}{r_w} - \frac{v}{R} \quad (13)$$

$$w_o = \frac{r_o}{r_w} - \frac{v}{R} \quad (14)$$

$$w_{fi} = \frac{r_{fi}}{r_w} - \frac{v}{R} \quad (15)$$

$$w_{fo} = \frac{r_{fo}}{r_w} - \frac{v}{R} \quad (16)$$

3.3 CAD y estructura mecánica del robot

El robot agrícola móvil (RAM) es un prototipo de plataforma robótica para estudios y desarrollos. El modelo CAD del robot es presentado en la figura 7.

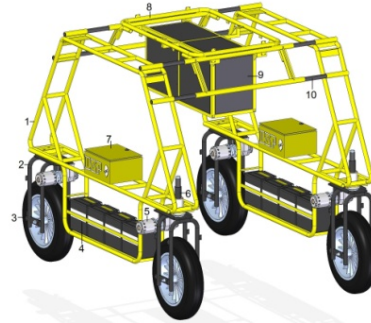


Fig. 7. Vista isométrica del robot RAM (Tabile et al., 2011)

La estructura mecánica del robot agrícola móvil fue proyectado usando la metodología de prototipado virtual con la utilización del herramientas CAD (Norton, 2000) en el presente caso fue usado el software *Solid Edge* de *Unigraphics Solutions* actualmente de la casa SIEMENS, el robot cuenta con diferentes sistemas para su funcionamiento un primer sistema de baterías o suministro de energía que se aprecia en la figura 8, un sistema de tracción, un sistema de dirección figura 9, la estructura soporte de los sistemas embarcados sensoriales figura 10.

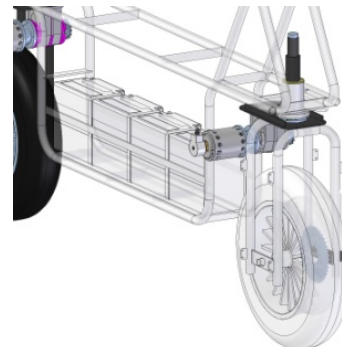


Fig. 8. Banco de baterías del robot RAM (Tabile et al., 2011)

Fueron utilizados cuatro motores de 24V y 750W Maxon, quienes usan la energía de las baterías transformándola en energía mecánica para el movimiento del robot. En el movimiento del robot la potencia necesaria para su tráfico cambiara dependiendo de las condiciones del terreno, aceleración y velocidad requerida (Wong, 1978) por lo tanto es necesario monitorear y ajustar constantemente la potencia de cada motor, buscando la obtención de parámetros necesarios.

Por consiguiente fue utilizado un controlador de potencia equipado con dos canales independientes, instalados en los cofres de control. Cada controlador realiza su labor sobre los motores delanteros y traseros de cada lado del robot. El control es realizado de acuerdo con los datos obtenidos del codificador que son procesados y llevados a un control PID (Ollero, 2001) o control dinámico con uso de control remoto. También puede ser atribuida una tolerancia al control para evitar sobrecarga del sistema con pequeñas variaciones que no influyen el desempeño durante la operación.

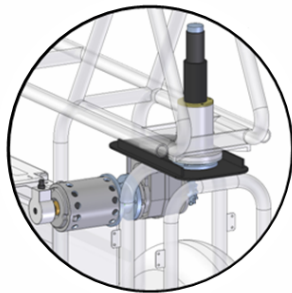


Fig. 9. Sistema de propulsión y dirección en el RAM. (Tabile et al., 2011)

En la figura 9 se aprecia el detalle del sistema de propulsión y el montaje del sistema de dirección fijado en el soporte delantero y este a su vez al cuadro lateral del robot agrícola móvil, la figura 10 muestra una vista explosionada de los componentes del sistema de propulsión y dirección, donde (1) codificador, (2) motor DC, (3) reductor, (4) Brida superior, (5) tuerca, (6) arandela, (7) Empaque, (8) rodamiento, (9) Brida inferior, (10) retenedor, (11) eje, (12) Marco, (13) engranaje, (14) soporte de engranaje, (15) reductor, (16) Empaque, (17) eje, (18) rodamiento, (19) Motor DC y (20) Codificador.

En la base del cuadro lateral donde las ruedas delanteras son fijadas hay un agujero a través del cual el eje del sistema de dirección es ubicado en el sentido de abajo hacia arriba, y fijada por cuatro

tornillos. Después van montados los rodamientos en el eje, el marco que soporta la rueda es fijado al eje del sistema, de dirección por cuatro tornillos. Dicho conjunto es proyectado para soportar cargas e impactos límite para la rueda y debe ser de fácil mantenimiento. Finalmente el conjunto reductor motor codificador es fijado por cuatro tornillos. El reductor usado tiene una reducción de 1:230, y la transmisión de torque al eje es hecha por chaveta. Es esencial que no exista holgura entre el acople y el motor para ser posible el control de dirección con la precisión deseado.

El sistema permite rotaciones de 90° y -90° , resultando una grande capacidad de maniobra.

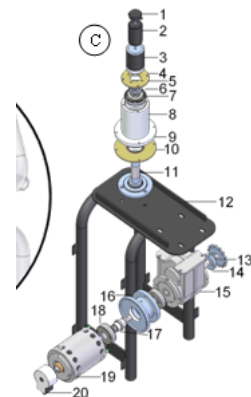


Fig. 10. Estructura soporte de los sistemas embarcados RAM (Tabile et al., 2011)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tomando los modelos matemáticos descritos y los parámetros físicos del robot se realizaron diferentes simulaciones tomando cada modelo cinemático presentado y al final comparando los resultados de las mismas. La primera simulación correspondió al modelo de Ramajani y es presentada en la fig. 11.

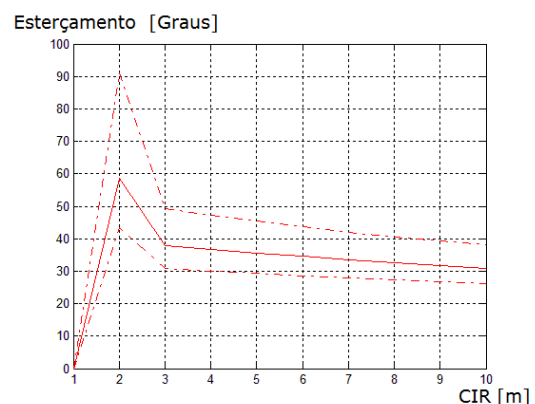


Fig. 11. Ángulo del robot para un radio deseado usando el modelo de bicicleta

La figura 11 presenta el modelo de bicicleta, el ángulo de orientación del robot es medido desde el C.G. (línea normal) para un radio de giro dado, las líneas punteadas representan los ángulos de las ruedas del robot al expandir el modelo de la bicicleta al modelo Ackerman, es claro que en este modelo los ángulos de dirección son simétricos respecto al ángulo de orientación del robot. La figura 12 presenta la simulación para el modelo desarrollado por Tabile *et al.*, 2011.

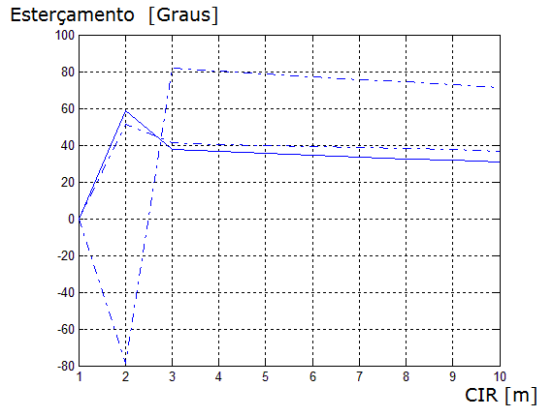


Fig. 12. Simulación del modelo Ackerman para el RAM

La figura 11 presenta ángulos de dirección de las ruedas mayores al ángulo de orientación del robot para valores de radio de giro mayores a 3 metros, entre cero y 3 metro de radio presenta valores menores. La figura 13 presenta la simulación para el modelo desarrollado por los autores del artículo.

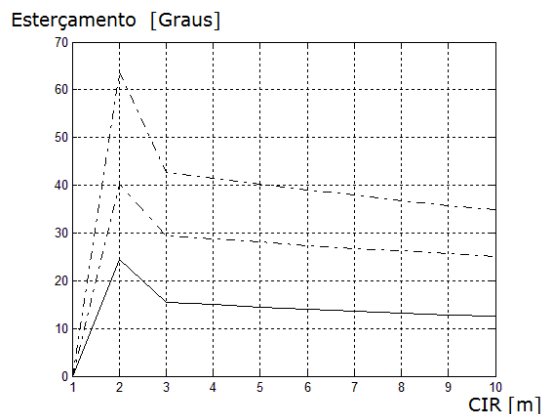


Fig. 13. Simulación del modelo cinemático presentado

El modelo presentado en la figura anterior muestra que para todos los posibles radios de curvatura los ángulos de las ruedas son mayores que el ángulo de orientación del robot, la gráfica al igual que las anteriores presenta un valor máximo para radio

igual a 2 metros valor que resulta por la singularidad geométrica del RAM.

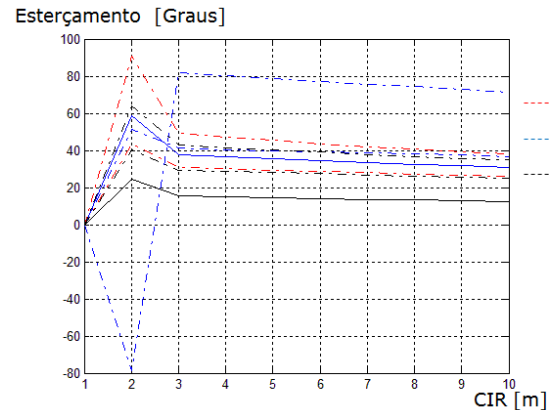


Fig. 14. Comparación entre los modelos cinemáticos

La figura 14 presenta la comparación entre los modelos cinemáticos para el RAM, observándose que ninguno de ellos coincide encontrando una tendencia similar entre el modelo Rajamani (líneas rojas) y el desarrollado por los autores (líneas negras), sin embargo no existe correspondencia entre los valores convergiendo solo para radios mayores a 10 metros. El modelo Ackerman desarrollado en (Tabile *et al.*, 2011) presenta valores muy distantes del modelo Ramajani siendo este último el más aceptado y presentado en la literatura automotriz.

La figura 15, presenta las velocidades angulares de cada rueda en función del radio de giro del robot complementado el modelo cinemático que junto con el ángulo de dirección determinan los parámetros necesarios para el control cinemático del robot RAM.

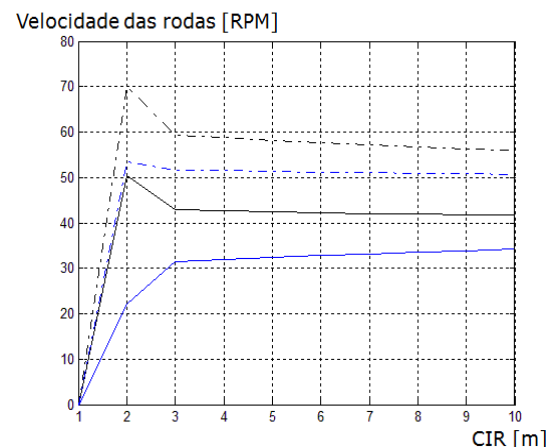


Fig. 15. Velocidad angular de las ruedas en función del radio de giro

5. CONCLUSIONES

El artículo presenta los detalles cinemáticos y mecánicos del robot Agrícola Móvil RAM del laboratorio NEPAS de la escuela de ingeniería de Sao Carlos USP.

Fueron presentadas simulaciones con tres modelos cinemáticos clásicos incluyendo un nuevo modelo cinemático desarrollado por los autores sin simplificaciones geométricas.

Las simulaciones mostraron que el modelo cinemático desarrollado se ajusta mejor al comportamiento esperado del robot proporcionando información valiosa al sistema de control conducente a la disminución del fenómeno de *Wheel slip* que pueda presentar el robot, gracias a los valores calculados de ángulos y velocidades angulares más precisas.

6. RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su reconocimiento al CNPq, EESC - USP y UIS por el apoyo y soporte al presente trabajo.

REFERENCIAS

- Bakker, T.; Asselt Vam, K.; Bontsema, J.; Müller, J.; Straten Van, G. (2010) "Systematic Design of an Autonomous Platform for Robotic Weeding". *Jornal of Terramchanics*, V.47, n.2, p.63-73..
- Bell, T. (2000) "Automatic Tractor Guidance Using Carrier-Phase Differential GPS". *Computer and Eletronics in Agriculture*, V25, n1/2, p.53-66.
- Buckholtz. K. R., (2002) "Reference Input Wheel Slip Tracking Using Sliding Mode Control". *SAE2002 World Congress Detroit*, Vol. 111, No. Part 6, p. 477.
- Kachroo P. and Tomizuka. "Vehicle Traction Control and its Applications".Tech. Rep., UIPRR-94-08 Inst. Transportation, Univ.
- Kise, M.; Noguchi, N.; Ishii, K.; Terão, H. (2002) "The Development of the Autonomous Tractor with Steerin Controller Applied by Otimal Control". *Proceeding of the Automation Technology for Off-Road Equipment*. Chicago-IL, 367-373p.
- Maxwell. Modelo Cinemático do Veículo. PUC-RJ. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/12328/12328_4.PDF> Acesso em 15/09/2012.
- Moravec, H., *Robots, after all*, Communications of the ACM, ACM Press, New York, Vol. 46, Ed. 10, 2003.
- Norton, R., *Projeto de Máquinas*. Prentice hall, segunda edição, São Paulo, 2000.
- Ollero, A. (2001) *Robótica, Manipuladores y robots móviles*, Primera edición, alfaomega, Barcelona,.
- Rajamani, R. (2006) *Vehicles Dynamics and Control*, Springer. USA..
- Reid, J. F.; Zang, Q.; Noguchi, N.; Dickson, M. . (2000), "Agricultural Automatic Guidance Research in North America". *Computers and Eletronics in Agriculture*, V.25, n.1-2, p.155-167.
- Savage. Supportive Autonomous Vehicle for Agriculture. Disponível em: <http://users.forthnet.gr/ath/startrek/index.html> Acesso em: 10/10/2012.
- Tabile, R. Godoy, E. Pereira, R. Tangerino, G. Porto, A. Inamasu, R. (2011) "Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot", *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.31, n.1, p.130-142, jan./fev.
- Wong. J., (1978) *Theory of Ground Vehicles*. 2nd ed. Wiley and Sons, New York.